PU EUROPE
EXCELLENCE IN INSULATION
FEDERATION OF EUROPEAN RIGID POLYURETHANE FOAM ASSOCIATIONS

Informator nr 15

# Środowiskowa i ekonomiczna analiza cyklu życia izolacji poliuretanowej w budynkach o małym zapotrzebowaniu na energię

## Streszczenie

Zachowanie w środowisku (environmental performance) i opłacalność to dwa główne kryteria wyboru dla specyfikacji wyrobów budowlanych. Razem z odpowiedzialnością społeczną reprezentują one również trzy filary zrównoważonego rozwoju.

Politycy, przemysł, organizacje pozarządowe i użytkownicy końcowi, wszyscy oni zgadzają się, że trzeba, by przemysł budowlany dążył do bardziej zrównoważonych koncepcji i projektów budynków. Kwestią, która dzieli, jest jednak to, w jaki sposób najlepiej ocenić ten rozwój zrównoważony i jakich narzędzi należy użyć, by pomóc budowniczym, projektantom, architektom czy politykom dokonywać bardziej świadomych wyborów materiałów.

Większość ekspertów uważa, że zrównoważony rozwój wyrobów budowlanych można ocenić jedynie na poziomie zespołu funkcjonalnego, czyli budynku, albo co najmniej części składowej lub elementu budynku. Ten pogląd podziela, między innymi, CEN/TC 350 – komitet techniczny odpowiadający za opracowanie europejskich zharmonizowanych norm dla oceny zrównoważonego rozwoju budynków.

Inni wolą ustalić wymagania dotyczące właściwości użytkowych samych wyrobów lub materiałów budowlanych, w przekonaniu, że zrównoważone budynki można otrzymać montując po prostu tak zwane „zielone wyroby". Ten punkt widzenia jest przyjmowany przy opracowywaniu większości kryteriów ekologicznych i zielonych zamówień publicznych na wyroby budowlane i sporządzaniu poradników stosowania, mających wpływać na wybór materiałów budowlanych. Można jednak pokazać, że w praktyce to podejście niekoniecznie musi prowadzić do najlepszych rozwiązań.

PU Europe zleciła BRE, Instytutowi Badawczemu Budownictwa (Building Research Establishment) Zjednoczonego Królestwa, ilościowe określenie środowiskowych i ekonomicznych kosztów stosowania izolacji PU i innych materiałów izolacyjnych w konstrukcjach budynków energooszczędnych.

**Z tego studium można wyciągnąć następujące wnioski:**

- **W wielu konstrukcjach budynków energooszczędnych izolacja PU wykazuje najniższe koszty cyklu życia dzięki większej oszczędności energii lub, w przypadku jednakowych współczynników oporu cieplnego R, zmniejszonemu zużyciu materiałów i wtórnych efektów w budynku.[1]**
- **Dzięki wysokiej skuteczności izolacji poliuretanowej (PU) i zredukowaniu efektów wtórnych w budynku zachowanie izolacji PU w środowisku w całym cyklu życia konstrukcji budynków energooszczędnych jest podobne do zachowania innych powszechnie stosowanych materiałów, takich jak wełna mineralna WM i EPS. W niektórych zastosowaniach izolacja poliuretanowa może być lepsza.**
- Rzeczywisty rozwój zrównoważony materiałów izolacyjnych można ocenić jedynie na poziomie systemu tj. całego budynku lub części składowej budynku. Wyboru materiału nie można oddzielić od kontekstu budynku i efektów wtórnych wyboru materiałów izolacyjnych i wynikające z tego grubości materiału mogą być znaczące z punktu widzenia zachowania w środowisku i opłacalności.
- Oceny opierające się na jednym wskaźniku (reprezentowana energia, wykorzystanie źródeł odnawialnych (bio-sourced)), oddzielone od kontekstu budynku i nie zawsze uwzględniające cały cykl życia wyrobu, nie zapewniają właściwych użytecznych informacji.

- Udział izolacji w całkowitym wpływie budynku (części składowej) na środowisko jest mały.
- Włączenie do modeli LCA i LCC wpływu większych obrysów zewnętrznych budynku na zachowanie w środowisku i koszty wymaga dalszych badań. W przypadku wolnostojącego domu jednorodzinnego zastosowanie mniej skutecznych materiałów izolacyjnych może spowodować wzrost obrysów zewnętrznych tego budynku sięgających 4 $m^2$ w porównaniu z obrysem zewnętrznym budynku z izolacją PU.

**Uwaga:**
Przemysł PU aktualizuje obecnie ekoprofile swoich najważniejszych surowców. Pierwsze wyniki wskazują, że we wszystkich kategoriach wpływu na środowisko (environmental impact) sumaryczny wpływ izolacji PU jest znacząco mniejszy niż liczby użyte w niniejszym studium. Przykładowo, dla poliolów potencjał globalnego ocieplenia można było zmniejszyć w ostatnich latach aż o 43 %. Poliole stanowią około 20-30 % wszystkich surowców. Rewizja ekoprofilu dla MDI (55-65 % surowców) jest w realizacji.

## Co to są LCA i LCC?

**Analiza cyklu życia (LCA)** jest kompilacją i oceną produktu „od kołyski aż po grób" oraz potencjalnego wpływu na środowisko systemu wyrobów w całym cyklu jego życia, obejmującym wydobycie surowców, produkcję, pracę i ostateczne pozbycie się różnych części składowych. W tym kontekście budynek lub zmontowany system jest uważany za „wyrób" i część „systemu wyrobów".[2]

Dla tego studium przeprowadzono oceny LCA, by zbadać wpływ na środowisko związany ze zużyciem materiałów i energii w alternatywnych konstrukcjach objętych tym projektem. Celem tej pracy było zbadanie, jak wpływ poszczególnych materiałów wypadał na tle innych materiałów i jak przedstawiał się na tle wpływu na zużycie energii podczas użytkowania.

W analizie LCA wzięto pod uwagę okres 50 lat, podobnie jak w części projektu dotyczącej kosztów cyklu życia. Wyniki przedstawiono w postaci opisanych i znormalizowanych danych dla następujących kategorii wpływu na środowisko:

- GWP Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (kg równoważnika $CO_2$)
- ODP Potencjał niszczenia warstwy ozonowej (kg równ. CFC11)
- EP Potencjal eutrofizacji (kg $PO_4$)
- AP Potencjal zakwaszenia (kg równ. $SO_2$)
- POCP Potencjał fotochemicznego tworzenia ozonu (kg równ. etylenu)

Tych wskaźników użyto, ponieważ są to wskaźniki wpływu proponowane przez TC350[3] w czasie, gdy projekt został zainicjowany. Dane znormalizowano do rocznych wpływów wywieranych przez obywatela Europy Zachodniej, obejmującej UE15 (plus Norwegia i Szwajcaria).

**Obliczanie kosztów cyklu życia (LCC)** jest techniką ustalania całkowitych kosztów posiadania. Jest to podejście strukturyzowane, zajmujące się wszystkimi elementami tych kosztów. Można go użyć do utworzenia profilu wydatków na środek trwały w jego oczekiwanym czasie życia. Dla wygody te koszty są zwykle rozważane w podziale na koszty początkowe, koszty operacyjne i koszty usunięcia (o ile ma to zastosowanie).

Analiza LCC wymaga, by przepływy gotówki były co roku dyskontowane, co ma odzwierciedlać czasową zależność funduszów. Zmianę wartości z upływem czasu oblicza się według wzoru X/(1+r)n.[4]

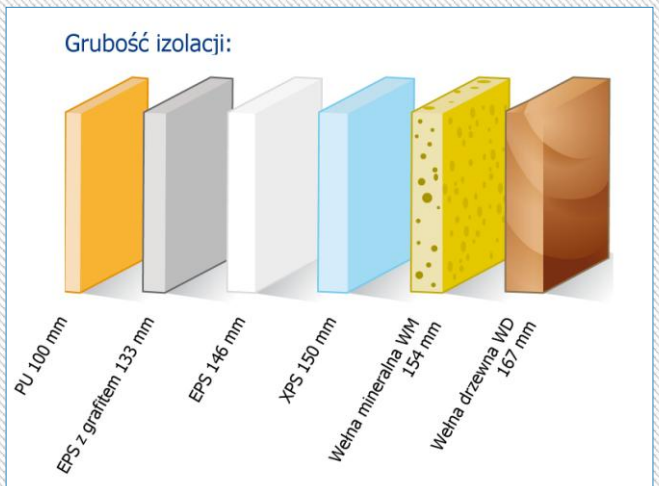
**Wybrać właściwą kolejność, by uzyskać najlepsze wyniki**

- Chociaż LCA i LCC mają niewątpliwie duże znaczenie, głównym celem izolacji jest zapewnienie większej energooszczędności budynków. Dlatego projektanci winni po pierwsze i przede wszystkim szukać rozwiązań gwarantujących najmniejsze przewodnictwo cieplne osłony budynku, by zminimalizować zużycie energii i zmaksymalizować oszczędności emisji $CO_2$ w całym czasie życia budynku.
- Po drugie, budynek należy zaprojektować, a jego części składowe dobrać, mając na uwadze zachowanie charakterystyk termicznych jego osłony przez cały czas życia budynku. Krytyczne znaczenie ma zmniejszenie ryzyka niepowodzenia oraz prawidłowe wyspecyfikowanie i wybór właściwego materiału. Szczególną uwagę należy zwrócić na przenikalność materiału dla par, wrażliwość na wilgoć i skraplanie, ruchy powietrza i ewentualną degradację fizyczną.
- Po trzecie, należy ocenić koszty ponoszone w ciągu czasu życia dla całej części składowej lub budynku, by wziąć pod uwagę wszelkie koszty ukryte albo dodatkowe związane z wymaganiami montażu specyficznymi dla danej izolacji.
- Dopiero po rozważeniu tych trzech głównych kryteriów należy lepiej dopracować możliwe wybory, oceniając środowiskowe zalety różnych opcji konstrukcyjnych na poziomie cyklu życia budynku.

## Dlaczego oceniać wyroby budowlane na poziomie budynku?

LCA w swej najprostszej postaci pozwala na wzięcie pod uwagę całego koszyka wpływów środowiskowych dla pojedynczego wyrobu budowlanego. Jednak projektanci, by ich porównania były sensowne, potrzebują informacji o całym elemencie budynku, takim jak mur, dach czy strop. Element budynku składa się zwykle z kilku wyrobów i w ekoprofilowaniu bierze się to pod uwagę, dodając do siebie wkłady elementów konstrukcji.

Jeżeli po prostu wybierze się części, z których każda z osobna wywiera mały wpływ na środowisko, i złączy się je ze sobą, nie musi to wcale przynieść optymalnych wyników dla całej konstrukcji elementu. Na przykład wyrób izolacyjny o małym wpływie na środowisko może mieć również niskie parametry i wymagać większej grubości dla uzyskania takiej samej wartości współczynnika U jak przewyższający go pod względem charakterystyk cieplnych wyrób o większym wpływie na środowisko. Większa grubość wyrobu o niższych parametrach może prowadzić do wtórnych skutków dla rozmiarów budynku i potrzebnych ilości innych materiałów, zwiększając zarówno wpływ na środowisko jak i koszty całej konstrukcji.




*Rysunek 1: Grubość różnych materiałów izolacyjnych o tym samym oporze cieplnym R*

W pewnych zastosowaniach ciężar warstwy izolacji może wahać się pomiędzy 1:6 a 1:10 dla tej samej wartości współczynnika przenikania ciepła U dla elementu konstrukcyjnego.

Dlatego kontekst ma decydujące znaczenie i posiadanie istotnych informacji umożliwia projektantom odpowiedzialnym za specyfikacje przeprowadzanie w praktyczny i realistyczny sposób sensownych porównań wpływu różnych konstrukcji na środowisko.

## Cele studium i opracowanie budynku modelowego

**Cele studium:**
Ogólnym celem omawianego studium było ilościowe określenie wkładu izolacji PU (PUR/PIR) w charakterystyki środowiskowe i ekonomiczne budynków o małym zapotrzebowaniu na energię i porównanie tego z zastosowaniem alternatywnych materiałów izolacyjnych możliwych do użycia w omawianych zastosowaniach. Szukano dowodów na to, że wyznaczanie kryteriów środowiskowych na poziomie wyrobu względnie porównywanie materiałów izolacyjnych bez dokładnej znajomości wymagań projektowych dla budynku nie prowadzą do sensownych wyników.

Innowacyjnym elementem tego studium było wyjście poza porównanie wpływu na środowisko odniesionego do jednostki ciężaru lub współczynnika R. Po raz pierwszy wzięto w studium pod uwagę wtórne skutki wyboru materiałów dla samego budynku (dodatkowe krokwie, większe fundamenty i dachy, dodatkowe wymagania etc.). To jest powód różnego wpływu materiałów konstrukcyjnych w różnych rozwiązaniach izolacji dla poszczególnych analizowanych elementów budynków.

**Budynek modelowy:**
BRE zaprojektował budynek modelowy i części składowe tego budynku, określił rozwiązania izolacji i wybrał materiały konstrukcyjne w oparciu o własne bazy danych. PU Europe zdefiniowała jedynie wartości współczynnika U dla części składowych w oparciu o poziomy dla budynków o małym zapotrzebowaniu na energię.

Budynkiem modelowym był mały dom wolnostojący z raportu BRE dla klientów „Standardowe mieszkania dla modelowania energetycznego" (CR444/98), autorstwa Petera Ilesa. Całkowita powierzchnia podłóg tego dwukondygnacyjnego budynku wynosiła 104 $m^2$, układy ogrzewania, oświetlenia itp. były stałe, jedynie izolacja konstrukcji budynku była zmieniana.

Wzięto pod uwagę trzy strefy klimatyczne: umiarkowaną śródziemnomorską, umiarkowaną oceaniczną i chłodną kontynentalną. Modelowane konstrukcje były wspólne i właściwe dla wszystkich stref klimatycznych ujętych w studium.

**Obliczanie wydzielania energii dla ogrzewania powietrza w pomieszczeniach:**
Do obliczania energii zużywanej na ogrzewanie powietrza w pomieszczeniach użyto wersji BRESAP zmodyfikowanej tak, by uwzględnić różne strefy klimatyczne na zewnątrz. Źródłem energii był gaz ziemny.

Pomiędzy poszczególnymi strefami klimatycznymi na zewnątrz wystąpiły oczywiście wyraźne różnice w zużyciu energii na ogrzewanie powietrza w pomieszczeniach. Na przykład, zużycie energii na ogrzewanie w nowych budynkach w chłodnej strefie kontynentalnej było o 140 % wyższe niż zużycie w strefie umiarkowanego klimatu oceanicznego.

Studium składa się z trzech części:

Część 1: wpływ izolacji w nowym budynku z perspektywy całego budynku.
Część 2: wpływ izolacji przy renowacji, gdy grubość jest ograniczona.
Część 3: wpływ izolacji w nowym budynku z ciepłymi dachami płaskimi.

**Model dla obliczania kosztów cyklu życia:**
Specyfikacja elementów i koszty wszystkich części składowych miały w zamierzeniu reprezentować typowe koszty ponoszone przez właścicieli budynku. Wykresy LCC przedstawiają łączne koszty po 50 latach eksploatacji przy 3.5 % stopie dyskontowej.

LCC oszacowano przy pomocy opracowanego przez BRE modelu kosztów, spełniającego wymagania BS/ISO 15686 Część 5[5], gdzie definiuje się koszty cyklu życia jako „Koszty aktywów lub ich części w całym cyklu ich życia przy spełnianiu wymagań dotyczących właściwości użytkowych". Dlatego w kosztach cyklu życia uwzględniono normalną konserwację i, odpowiednio, części składowe zużywane z biegiem czasu.

## Wyniki studium

### Część 1: Wpływ izolacji w nowym budynku z perspektywy całego budynku – wpływ przewodności cieplnej

W pierwszej analizie przypadku analizowano cały nowy budynek –wolnostojący dwukondygnacyjny dom z trzema sypialniami. Przyjęto następujące wartości współczynnika U dla różnych części składowych budynku:

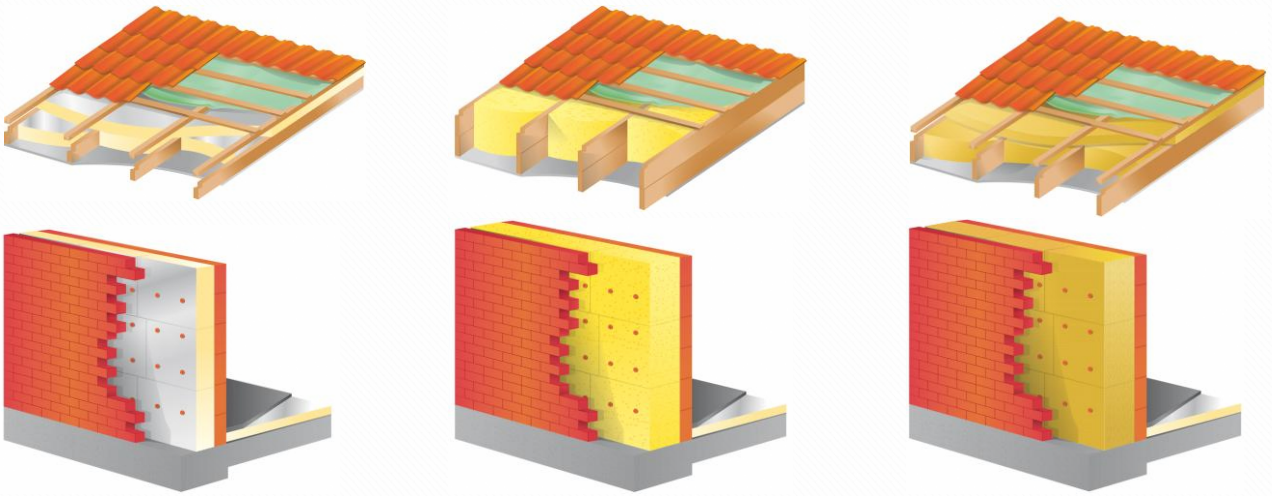
| | |
|---|---|
| Dach skośny: | 0.13 W/m$^2$·K |
| Mur szczelinowy: | 0.15 W/m$^2$·K |
| Podłoga parteru: | 0.18 W/m$^2$·K |
| Okna: | 2.10 W/m$^2$·K |

Straty ciepła spowodowane przez mostki cieplne: wartość y-value = 0.08 W/m$^2$·K.

Analiza miała na celu ocenę właściwości użytkowych każdej z konstrukcji, w których wykorzystano różne rozwiązania izolacji oparte na PU, wełnie kamiennej WK i wełnie szklanej WS. Z powodu różnic wartości przewodności cieplnej użyto różnych grubości izolacji, by uzyskać te same wartości współczynnika U. Istotnie, dla uzyskania wartości U równej 0.15 W/m$^2$·K dla muru szczelinowego wystarczyło 180 mm izolacji PU, natomiast rozwiązania z wełną szklaną WS i wełną kamienną wymagały warstwy izolacji o grubości 270 mm. W rozwiązaniach dla dachu skośnego użyto 190 mm PU, 300 mm wełny szklanej WS i 310 mm wełny kamiennej WK.

| Izolacja | Poliuretan | | Wełna kamienna WK | | Wełna szklana WS | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Zastosowanie | Mur szczelinowy | Dach skośny | Mur szczelinowy | Dach skośny | Mur szczelinowy | Dach skośny |
| Grubość *mm* | 180 | 90* 100** | 270 | 220* 90** | 270 | 300* |
| Gęstość *kg/m$^3$* | 32 | 32 | 39 | 45* 145** | 17 | 17 |
| Ciężar *Kg/m$^2$* | 5.76 | 5.76 | 10.53 | 22.95 | 4.59 | 4.59 |
| Lambda *W/mk* | 0.022 | 0.023 | 0.037 | 0.038 | 0.032 | 0.037 |
| Współczynnik U *W/m$^2$K* | 0.15 | 0.13 | 0.15 | 0.13 | 0.15 | 0.13 |

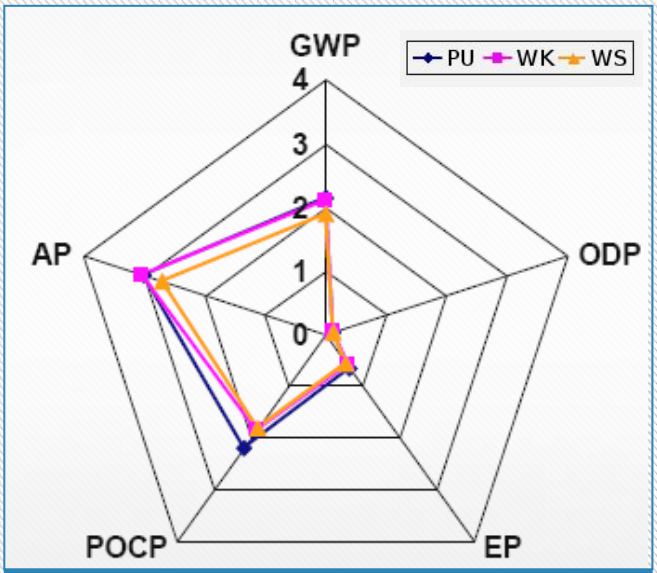
**Między krokwiami*
***Nad krokwiami*




*Rysunek 2: Rozwiązania konstrukcyjne dla izolacji dachu skośnego i muru szczelinowego, odzwierciedlające rzeczywiste stosunki grubości warstw izolacji*

Ponieważ pole powierzchni mieszkalnej wewnątrz i objętość musiały pozostać niezmienione, konstrukcję budynku musiano dostosować do różnic w grubościach części składowych (Rysunek 2).

**Analiza cyklu życia:**
Rysunek 3 przedstawia znormalizowany wpływ na środowisko dla pięciu wybranych wskaźników (GWP, AP, POCP, EP i ODP) dla rozwiązań izolacji z PU, wełny szklanej WS i wełny kamiennej WK.




*Rysunek 3: Cały budynek: Znormalizowane wpływy na środowisko w podziale na kategorie (umiarkowany klimat oceaniczny)*

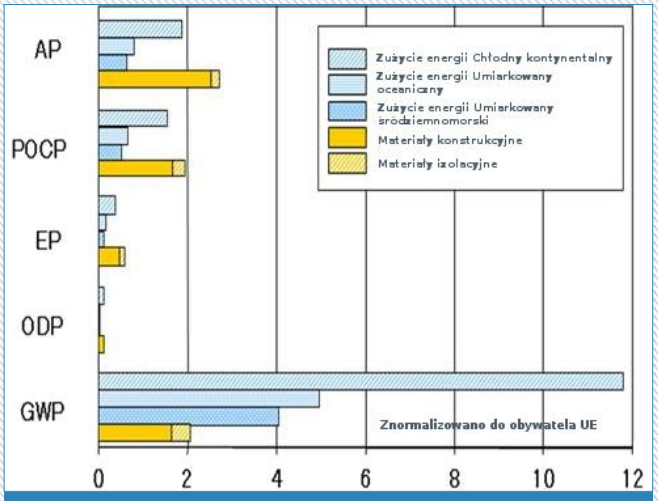
Dane znormalizowane dają porównanie względnych wielkości każdej kategorii wpływu na środowisko. Wyniki wyłączają wkład wpływu na środowisko energii zużytej w fazie użytkowania budynku, ponieważ jest on taki sam dla wszystkich trzech rozwiązań konstrukcyjnych.

Pajęczyna pokazuje wyraźnie, że na poziomie budynku nie ma znaczących różnic poziomów właściwości użytkowych. Wyniki były podobne dla wszystkich trzech stref klimatycznych.

Należy zauważyć, że we wszystkich trzech przypadkach podłoga na parterze była izolowana poliuretanem przy stałej wartości współczynnika U równej 0.18 W/m$^2$·K. Osobny rozdział poświęcono EPS jako alternatywie dla PU w podłodze parteru i wyciągnięto ten sam wniosek - nie ma wartej wzmianki różnicy wpływu tych dwóch materiałów na środowisko.

Omawiane studium pozwoliło również na porównanie wpływu na środowisko ucieleśnionego w materiałach konstrukcyjnych i izolacyjnych ze zużyciem przez budynek energii w trzech strefach klimatycznych (Rysunek 4).

Rysunek 4 pokazuje, że materiały konstrukcyjne i izolacyjne zamodelowanego domu są odpowiedzialne za jedynie około jednej trzeciej całkowitego potencjału globalnego ocieplenia (GWP), podczas gdy dwie trzecie są wywołane zużyciem energii przez budynek. To stoi w pewnej sprzeczności z twierdzeniami, że w konstrukcjach energooszczędnych wpływ materiałów konstrukcyjnych na środowisko przekracza wpływy z okresu użytkowania budynku.



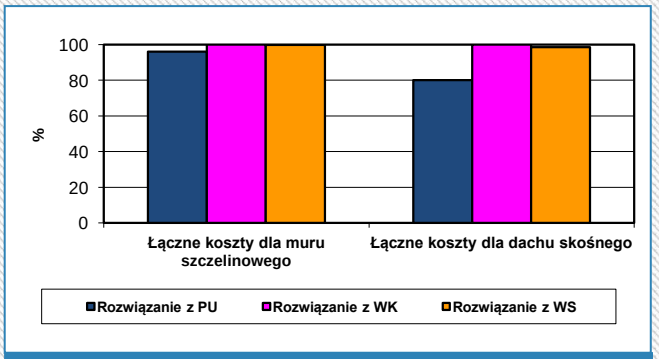

*Rysunek 4: Znormalizowane dane – Zużycie energii, materiały konstrukcyjne i izolacyjne (Wpływ materiałów konstrukcyjnych i izolacyjnych jest średnią dla trzech rozwiązań)*

Z drugiej strony, całkowite AP, POCP i EP materiałów konstrukcyjnych i izolacyjnych są wyższe od wpływów wynikających z używania energii w budynku.

Innym ważnym wnioskiem jest to, że udział materiałów izolacyjnych w całkowitym wpływie budynku na środowisko jest bardzo mały.

**Koszty cyklu życia:**

Analiza LCC dla elementu ściennego i elementu dachowego pokazała, że dla wszystkich stref klimatycznych i w każdym przypadku rozwiązanie z PU jest w 50-letnim cyklu życia elementu budynku bardziej opłacalne. W szczególności dach skośny z PU okazał się tańszy o 20 % (Rysunek 5). Podłogą na parterze nie zajmowano się, ponieważ we wszystkich przypadkach użyto PU.




*Rysunek 5: LCC dla rozwiązań dla ściany szczelinowej i dachu skośnego w umiarkowanym klimacie oceanicznym (łączne koszty w ciągu 50 lat, stopa dyskontowa 3.5 %)*

Wyższe koszty całkowite dla rozwiązań z wełną szklaną WS i wełną kamienną WK można wytłumaczyć potrzebą użycia innych ilości izolacji dla uzyskania wymaganych wartości współczynnika U i wtórnymi wpływami grubości izolacji na sam budynek. W przypadku muru szczelinowego potrzeba więcej ceglanego muru zewnętrznego, dłuższych ściągów ścian i większego fundamentu. Na wyniki dla dachu skośnego wpływa konieczność użycia głębszych krokwi i większego pola powierzchni pokrycia dachowego.

Jednym ze skutków zastosowania grubszej szczeliny w murze jest dodatkowa powierzchnia śladu dachu i podłogi. Na dużym placu budowy może to wpłynąć na gęstość albo liczbę domów, które można zbudować w tym miejscu, np. w najgorszym przypadku dodatkowe 4.00 $m^2$ powierzchni dachu każdego domu może oznaczać, że jedynie 9 domów można zmieścić na obszarze, który mógłby pomieścić 10 domów, gdyby mury zewnętrzne były cieńsze. Potencjalnych kosztów i wpływów tego na środowisko nie wzięto w omawianym studium pod uwagę. Może to być obszarem dalszych badań.

W odrębnym rozdziale zajęto się rozwiązaniami z izolacją PU i EPS pozwalającymi na uzyskanie wartości współczynnika U równej 0.18 $W/m^2 \cdot K$ dla podłogi parteru. Wyniki pokazały, że koszty cyklu życia 95 mm izolacji PU są we wszystkich strefach klimatycznych mniejsze o około 7 % od kosztów 185 mm ekspandowanego polistyrenu.

**Wnioski dla części 1:**

- **LCA**
  Analiza pokazała, że na poziomie budynku wszystkie rozwiązania izolacji charakteryzują się bardzo podobnym ogólnie rozumianym zachowaniem w środowisku. Można też było pokazać, że wkład materiału izolacyjnego w całkowite obciążenie środowiska przez budynki jest bardzo ograniczony. Nawet w budynkach o małym zapotrzebowaniu na energię, energia zużyta w fazie użytkowania budynku przyczynia się do globalnego ocieplenia daleko bardziej, niż materiały konstrukcyjne i izolacyjne. Z drugiej strony, AP, EP i POCP tych materiałów są większe od powodowanych zużyciem energii w budynku.

- **LCC**
  Spośród wszystkich rozwiązań konstrukcyjnych rozpatrywanych w studium BRE poliuretan (PU) wykazuje najmniejsze koszty cyklu życia. Chociaż tego wyniku nie można po prostu rozciągnąć na wszystkie możliwe rozwiązania konstrukcyjne budynków, jest to wyraźny wskaźnik opłacalności PU.

## Część 2: Wpływ izolacji na istniejące budynki – wpływ ograniczeń grubości

W części 2 rozpatrzono typowy przypadek renowacji. Przyjęty sposób izolowania istniejących ścian to dodanie izolacji po wewnętrznej stronie murów zewnętrznych (okładzina wewnętrzna), przy czym założono, że właściciele / użytkownicy budynku nie będą chcieli tracić cennej przestrzeni wewnętrznej. Dlatego grubość warstwy izolacji, która ma być zamontowana, ograniczono do 50 mm. Łącznie należało zaizolować w modelowanym domu 134 $m^2$ powierzchni ścian.

Wynikiem ograniczeń grubości są różnice wartości współczynnika U dla różnych rozwiązań izolacji opartych na materiałach izolacyjnych rozpatrywanych w studium. To z kolei prowadzi do różnych poziomów zużycia energii w fazie użytkowania budynku, przy czym rozwiązanie z PU oferuje największe oszczędności energii.

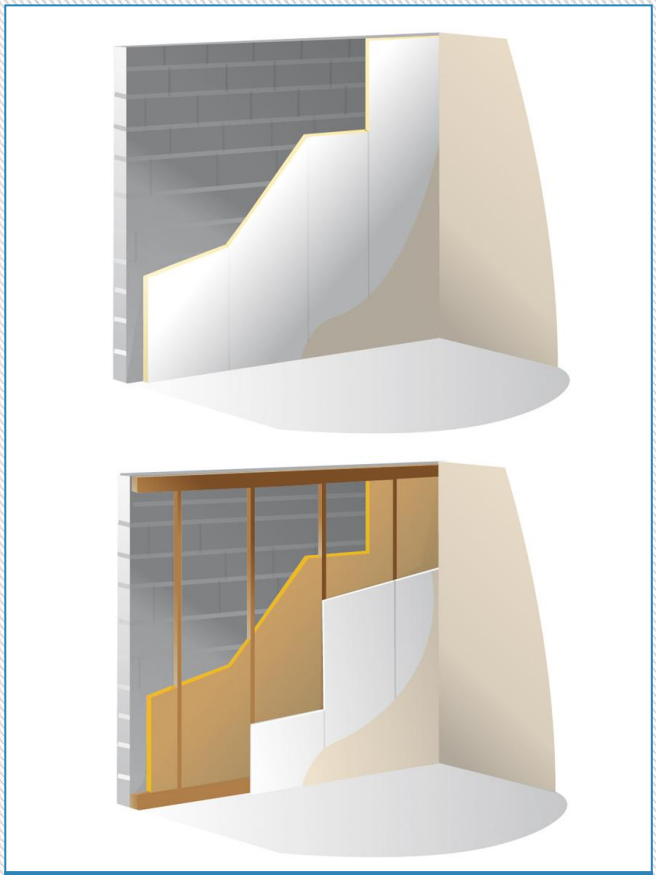
Całkowita sprawność (cieplna) modelowego budynku byłą mniejsza niż nowego budynku rozpatrywanego w części 1. Przyjęto następujące wartości współczynnika U:

Dach skośny: 0.40 $W/m^2 \cdot K$
Podłoga parteru: 0.67 $W/m^2 \cdot K$
Okna: 2.7 $W/m^2 \cdot K$

Straty ciepła spowodowane przez mostki cieplne: wartość y = 0.15 $W/m^2 \cdot K$.

| Izolacja | Rozwiązanie z PU | Rozwiązanie z EPS | Rozwiązanie z WK | Rozwiązanie z WS |
|---|---|---|---|---|
| **Grubość** *mm* | 50 | 50 | 50 | 50 |
| **Gęstość** *kg/m³* | 32 | 30 | 39 | 24 |
| **Lambda** *W/mk* | 0.023 | 0.034 | 0.037 | 0.035 |
| **Współczynnik U** *W/m²K* | 0.36 | 0.47 | 0.54 | 0.54 |
| **Powierzchnia ścian** *m²* | 134 | 134 | 134 | 134 |

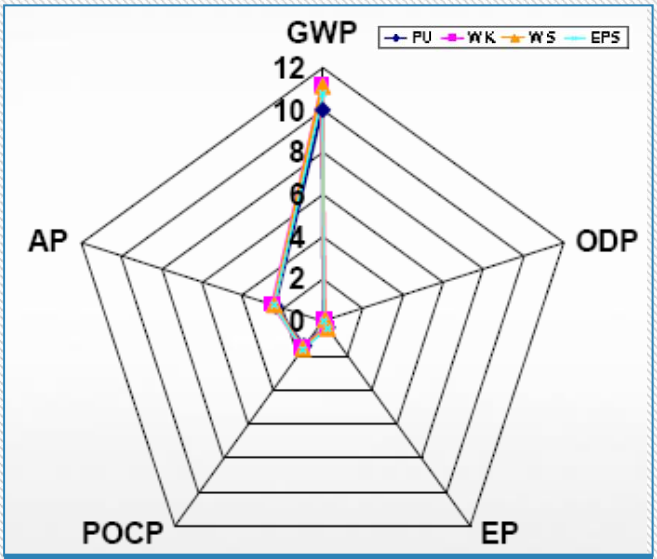
BRE zaproponował do modelowania dwie różne techniki montażu, reprezentatywne dla praktyki powszechnie stosowanej, gdy używa się różnych materiałów izolacyjnych. Użyte materiały instalacyjne to klej dla PU i EPS oraz szkielet drewniany dla wełny szklanej WS i wełny kamiennej WK (patrz Rysunek 6).



*Rysunek 6: Techniki montażu zastosowane dla PU i EPS (po lewej) oraz wełny szklanej WS i wełny kamiennej WK (po prawej)*

**Analiza cyklu życia:**
LCA objęła nie tylko wpływ materiałów konstrukcyjnych / izolacyjnych na środowisko, ale także wpływ wywołany zużyciem energii w fazie użytkowania budynku. Było to niezbędne, ponieważ różne rozwiązania izolacji charakteryzowały się różnymi wartościami współczynnika U, a stąd różnymi poziomami zużycia energii.

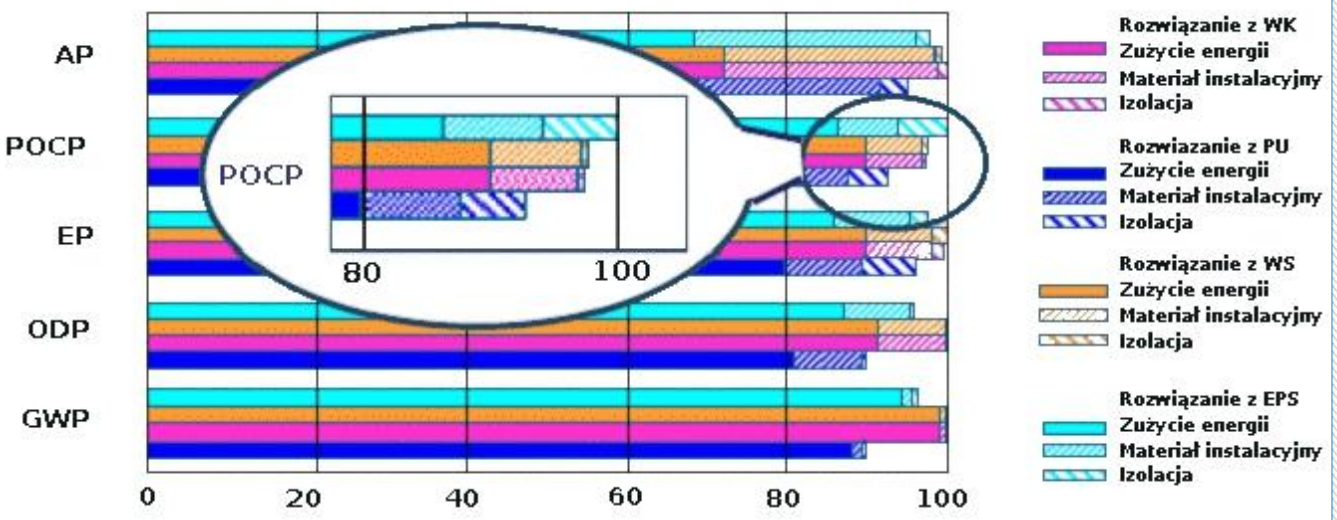
Analiza ponownie pokazała dla wszystkich trzech stref klimatycznych podobny wpływ na środowisko wszystkich rozpatrywanych rozwiązań konstrukcyjnych (patrz Rysunek 7).




*Rysunek 7: Okładzina wewnętrzna: Znormalizowane wpływy na środowisko w podziale na kategorie (umiarkowany klimat oceaniczny)*

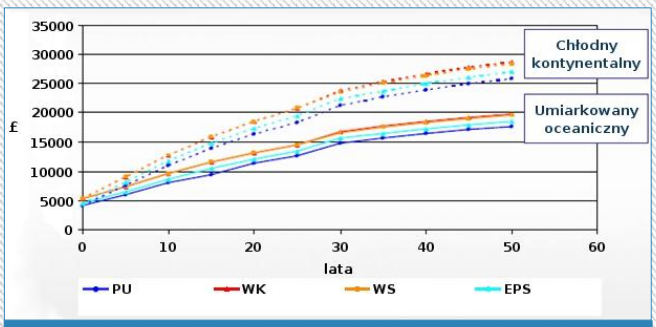
W studium rozpatrzono również oddzielnie wkłady zużycia energii, materiałów okładziny wewnętrznej i izolacji, zmierzono ich wpływ na każdy ze wskaźników środowiskowych i wyrażono wyniki w znormalizowanej postaci, tj. jako procent wartości maksymalnej w każdej kategorii wpływu (Rysunek 8). Prowadzi to do następujących wniosków:

- Jeśli spojrzeć na wyniki ogólne, różnice pomiędzy poszczególnymi rozwiązaniami w każdej kategorii wpływu nie są istotne. Najważniejsze różnice można znaleźć we wkładach w globalne ocieplenie, gdzie wkład dla rozwiązania z PU jest o około 9 % mniejszy niż dla najgorszego rozwiązania. Z punktu widzenia LCA ta różnica nie jest jednak znacząca.
- Z wyjątkiem potencjału zakwaszenia (AP) wkład materiałów instalacyjnych dla okładziny wewnętrznej w całkowity wpływ części składowej budynku mieści się w zakresie od małego do pomijalnego. Wpływ materiałów izolacyjnych na środowisko jest pomijalny we wszystkich kategoriach wpływu.
- Powiększona część Rysunku 8 pokazuje, że o ile wpływ rozwiązania z PU na środowisko jest dla niektórych wskaźników duży, o tyle ogólny wpływ tego rozwiązania okazuje się podobny lub nieco mniejszy od wpływu innych rozwiązań. Wynika to stąd, że większa oszczędność energii osiągnięta przez PU kompensuje jego większy wpływ na środowisko. Jest to dobry przykład, ilustrujący dlaczego wyboru materiału izolacyjnego nie można odseparować od kontekstu cyklu życia budynku.




*Rysunek 8: Wyniki LCA wyrażone w postaci znormalizowanej (wartości odniesione do wartości maksymalnej w każdej kategorii wpływu) – Analiza wkładu energii i materiałów (umiarkowany klimat oceaniczny)*

**Koszty cyklu życia:**
Analiza LCC dla wewnętrznej izolacji ścian dała podobne wyniki dla wszystkich trzech stref klimatycznych. Przeciętnie, w 50-letnim cyklu życia rozwiązanie z EPS jest o 8 % droższe, a rozwiązania z wełną mineralną WM o 11 % droższe od rozwiązania z PU (Rysunek 9). Większą opłacalność PU można wyjaśnić większą oszczędnością energii osiągniętą w fazie użytkowania budynku.




*Rysunek 9: LCC dla rozwiązań z wewnętrzną okładziną w dwóch strefach klimatycznych (50-letnie koszty łączne, stopa dyskontowa 3.5 %)*

**Wnioski dla części 2:**

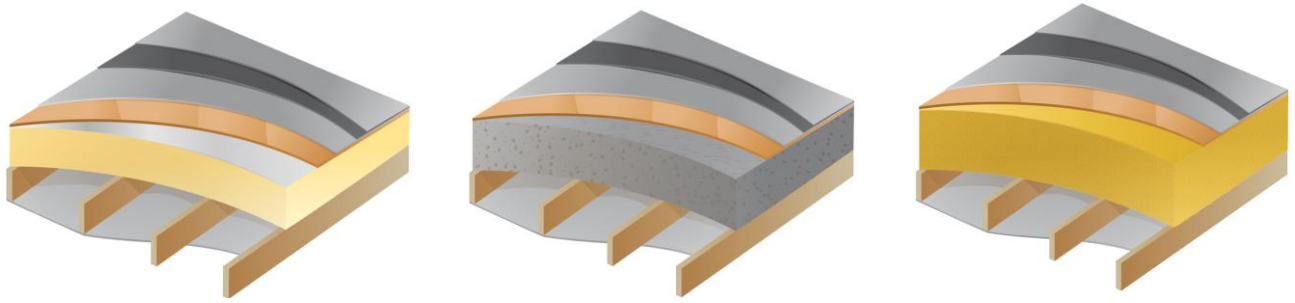
- **LCA**
  Analiza pokazała, że na poziomie budynku wszystkie rozwiązania izolacji wykazują bardzo podobne ogólne zachowanie w środowisku. Większa oszczędność energii osiągnięta w rozwiązaniu z PU kompensuje z nadmiarem większy wpływ samego materiału PU dla wszystkich wskaźników wpływu.
- **LCC**
  Spośród wszystkich rozwiązań konstrukcyjnych omówionych w tym rozdziale rozwiązanie z PU wykazało najniższe koszty cyklu życia.

## Część 3: Nowy budynek z ciepłym dachem płaskim – wpływ szczególnych wymagań technicznych

W części 3 studium dach modelowanego budynku zastąpiono płaskim dachem o wartości współczynnika U równej 0.15 W/m$^2$·K (Rysunek 10). Zużycia energii w fazie użytkowania budynku nie brano pod uwagę, ponieważ założono, że jest ono takie same dla wszystkich rozwiązań.

Materiały izolacyjne stosowane w płaskich dachach, szczególnie w dachach, po których się chodzi, muszą oferować dodatkowe własności mechaniczne, takie jak wystarczająca wytrzymałość na ściskanie, własności sprzyjające chodzeniu (walkability) i odpowiednią gęstość. Może to wpływać na ogólne zachowanie konkretnego materiału w środowisku.

BRE zaproponował, w oparciu o wartość współczynnika U, jaką należało uzyskać i wartości przewodności cieplnej



***Poliuretan (PU)*** ***Polistyren ekspandowany (EPS)*** ***Twarda wełna kamienna (WK)***

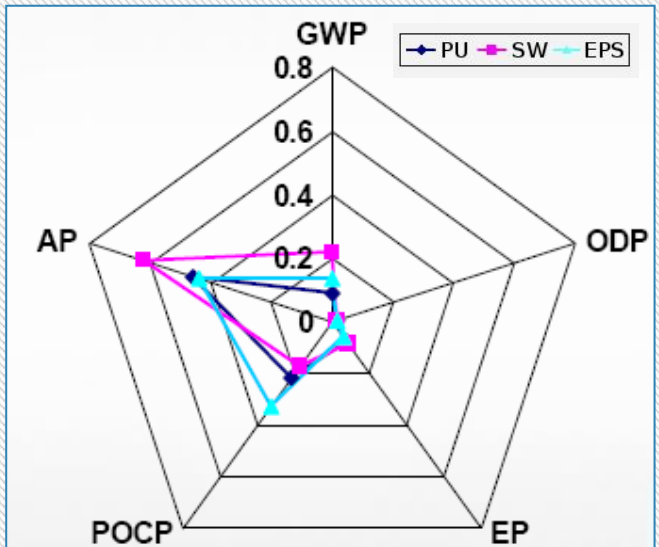
*Rysunek 10: Rozwiązania konstrukcyjne dla izolacji dachu płaskiego, odzwierciedlające rzeczywiste stosunki grubości warstw izolacji*

materiałów izolacyjnych, następujące rozwiązania konstrukcyjne dla typowego dachu płaskiego:

| Izolacja | PU | EPS | WK |
|---|---|---|---|
| **Gęstość** ***kg/m³*** | 32 | 30 | 39 |
| **Przewodność cieplna** ***W/mK*** | 0.023 | 0.034 | 0.038 |
| **Grubość** ***mm*** | 150 | 220 | 255 |
| **Powierzchnia dachu** ***m²*** | 64 | 64 | 64 |
| **Ciężar** ***Kg/m²*** | 307 | 422 | 2121 |

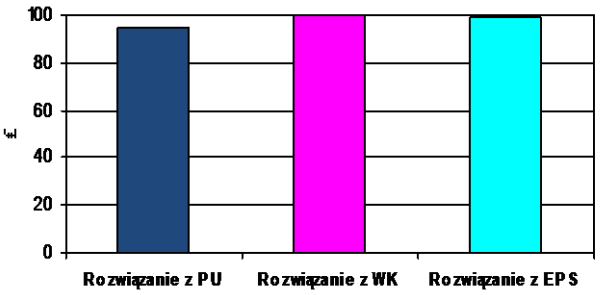
**Analiza cyklu życia:**
Inaczej niż w częściach 1 i 2 analiza dachu płaskiego doprowadziła do bardziej znaczących różnic pomiędzy rozwiązaniami z różnymi materiałami (Rysunek 11). Dla rozwiązania z PU otrzymano GWP mniejszy o 26 % niż dla rozwiązania z wełną kamienną WK. Wskaźnik POCP dla rozwiązania z PU jest o 30 % mniejszy niż ten wskaźnik dla EPS, a AP jest o 57 % mniejszy niż dla wełny kamiennej WK.

Te znaczące różnice można wyjaśnić tym, że PU może zapewnić bardzo dobre własności mechaniczne przy małej gęstości i małej grubości, co zmniejsza zapotrzebowanie na materiał. Istotnie, płaski dach o powierzchni 64 $m^2$ analizowany w tym studium wymagał 307 kg PU, 422 kg EPS i 2121 kg twardej wełny kamiennej WK.




*Rysunek 11: Dach płaski: Znormalizowane wpływy na środowisko w podziale na kategorie (materiał pokrycia dachowego i izolacja)*

**Koszty cyklu życia:**
Wyniki dla analizowanego w części 3 nowego ciepłego dachu płaskiego pokazały, że najniższy koszt cyklu życia (- 5 %) przy stosowaniu we wszystkich regionach ma 150 mm poliuretanu, po nim 220 mm polistyrenu ekspandowanego EPS i 225 mm izolacji z wełny kamiennej WK (patrz Rysunek 12).




*Rysunek 12: LCC dla izolowanego dachu płaskiego (łączne koszty w ciągu 50 lat, stopa dyskontowa 3.5 %)*

**Wnioski dla części 3:**

- **LCA**
  Tam, gdzie potrzebne są szczególne własności mechaniczne, użycie poliuretanu z jego małą gęstością i małą grubością może przynieść znaczące zyski dla środowiska.
- **LCC**
  Rozwiązanie z PU wykazało najniższe koszty cyklu życia.

## Wnioski

Niniejsze studium, jakkolwiek sprecyzowane przez niezależną stronę trzecią i bazujące na powszechnie stosowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych, nie może odzwierciedlać wszystkich możliwych wyborów architektonicznych i materiałowych. Dlatego otrzymanych wyników nie można automatycznie rozciągnąć na wszystkie budynki. Ze studium tego wynikają jednak pewne cenne wnioski, które można wykorzystać w dalszej pracy badawczej:

- Izolacja ma kluczowe znaczenie dla zrównoważonego budownictwa.
- Wyboru materiału izolacyjnego nie można odseparować od kontekstu konkretnego budynku.
- Ogólnie biorąc materiały izolacyjne mają mały wpływ na całościowe zachowanie budynku w środowisku, nawet w przypadku budynków o małym zapotrzebowaniu na energię. Najbardziej powszechne

materiały izolacyjne, porównywane ze sobą, wykazują bardzo podobne zachowanie w środowisku, gdy ocenia się je na poziomie budynku w całym cyklu życia.

- Dlatego wybór materiałów izolacyjnych należy w pierwszym rzędzie i przede wszystkim opierać na ich zdolności zapewnienia najlepszych charakterystyk energetycznych na poziomie budynku i zachowania określonego poziomu właściwości użytkowych w całym cyklu ich życia.
- Zamierzano ująć w tym studium wełnę drzewną WD. Trzeba było jednak pominąć ten materiał z braku odpowiednich ogólnodostępnych danych LCI, które pozwoliłyby na włączenie tego wyrobu do analiz LCA. Potrzeba więcej badań, by można było włączyć materiały izolacyjne pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego w tego typu prace studyjne.
- Przewodność cieplna i w pewnych przypadkach gęstość izolacji są krytycznymi własnościami branymi pod uwagę w ocenach LCA i LCC, ponieważ określają one zapotrzebowanie na materiały i wtórne skutki dla konstrukcji budynku, a stąd całościowe zachowanie w środowisku i koszty.
- Tam, gdzie potrzebne są szczególne własności mechaniczne, jak na płaskim dachu, użycie poliuretanu może prowadzić do znacząco lepszego zachowania w środowisku.
- Rozwiązania z izolacją z PU w budynkach o małym zapotrzebowaniu na energię oferują małe koszty cyklu życia i mogą w tym względzie znacząco przewyższyć inne rozwiązania izolacji.
- W dalszych pracach badawczych należałoby ocenić ilościowo wpływ większych obrysu zewnętrznego budynku, wynikających z większych grubości ścian zarówno na zachowanie w środowisku jak i na koszty.

## Słownik pojęć

| | |
|---|---|
| **AP** | (Acidification potential) Potencjał zakwaszenia |
| **EP** | (Eutrophication potential) Potencjał eutrofizacji |
| **EPS** | Polistyren ekspandowany |
| **GWP** | (Global warming potential) Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego |
| **LCA** | (Life cycle assessment) Ocena cyklu życia (analiza) |
| **LCC** | (Life cycle costs) Koszty cyklu życia |
| **LCI** | (Life cycle inventory) Inwentarz cyklu życia |
| **ODP** | (Ozone depletion potential) Potencjał niszczenia wartwy ozonowej |
| **PU** | Poliuretan (PUR/PIR) |
| **POCP** | (Photochemical ozone creation potential) Potencjał fotochemicznego tworzenia ozonu |
| **R** | Opór cieplny ($m^2$·K/W) |
| **U** | Współczynnik przenikania ciepła (W/$m^2$·K) |
| **WD** | Wełna drzewna |
| **WK** | Wełna kamienna |
| **WM** | Wełna mineralna |
| **WS** | Wełna szklana |
| **XPS** | Polistyren ekstrudowany |

## Przypisy

[1] Dodatkowe efekty, które są konsekwencją zastosowania wybranego rozwiązania. Np. zastosowanie izolacji PU w budynku może wpłynąć na wielkość budynku w obrysie, wielkość i ilość konstrukcji, długość łączników itp

[2] prEN 15643-1:2008 Zrównoważony rozwój obiektów budowlanych – Ocena zrównoważonego rozwoju budynków – Część 1: Ramy ogólne

[3] TC350 jest Komitetem Technicznym odpowiedzialnym za rozwijanie znormalizowanych metod oceny aspektów zrównoważonego rozwoju nowych i istniejących obiektów budowlanych i za normy deklarowania wyrobów budowlanych z punktu widzenia ochrony środowiska. [3] X=input value, r= rate of interest or discount rate, n= number of years

[4] X = wartość wejściowa, r = stopa procentowa lub stopa dyskontowa, n = liczba lat

[5] BS/ISO 15686-5 2008 Budynki i aktywa budowlane – Planowanie czasu eksploatacji– Część 5: Obliczanie kosztów cyklu życia